

Тепловой расчет полупроводниковых устройств СВЧ в импульсном режиме

Приведены теоретические соотношения и результаты расчета нагрева полупроводниковых устройств СВЧ, позволяющие находить максимально допустимые мощности приборов, работающих как в стационарном, так и в нестационарном режиме. Основное внимание уделено импульсному СВЧ сигналу.

Ключевые слова: тепловые режимы полупроводниковых устройств, уравнение теплопроводности Фурье, стационарный нагрев, нестационарный нагрев.

Введение. В радиосистемах используются преимущественно два типа сигналов непрерывный и импульсный, создающие соответственно стационарный и нестационарный нагрев. Параметрами импульсного режима является длительность радиоимпульса t_u , период повторения T_u и их отношение, называемое скважностью и обозначаемое как q_u . Как известно, тепловые поля, создаваемые внутренними источниками (внешние источники тепла в докладе не рассматриваются), описываются дифференциальным уравнением теплопроводности [1]:

$$\Delta T - \frac{c\rho}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{\lambda} q(x, y, z), \quad (1)$$

где ΔT - лапласиан температуры T в точке (x, y, z) ; c - теплоемкость; λ - теплопроводность; ρ - плотность материала; $q(x, y, z)$ - тепловыделение внутренних источников; t - время.

и законом теплопроводности Фурье

$$\overrightarrow{q}(x, y, z) = -\lambda \text{grad } T \quad (2)$$

Уравнения теплопроводности написаны для общего случая нестационарного нагрева, причем скорость распространения тепла при этом принята бесконечно большой. Уравнение (1) описывает, как случай непрерывного, так и импульсного воздействия высокочастотного сигнала на произвольное устройство СВЧ, то есть описывает нестационарную во времени пространственную трехмерную задачу.

Этот математический аппарат применим для всех типов устройств как пассивных, таких, как делители антенных решеток, так и активных, например, транзисторы, диоды или интегральные схемы (ММИС).

Если в пассивных устройствах тепло создается распределенными источниками, то для активных полупроводниковых элементов источником тепла является полупроводниковый переход, размер которого существенно меньше длины волны, то есть источник следует, как правило, рассматривать как сосредоточенный.

Транзисторы и микросхемы СВЧ представляют собой изолирующие теплопроводящие подложки GaAs или SiC толщиной около 50-100 микрон и эпитаксиальные слои, выращенные методами гетеродиффузии. Если для пассивных устройств можно свести задачу теплопроводности к уравнению Пуассона, то второй случай, более общий, приводит к параболическому дифференциальному уравнению с временной зависимостью (1), то есть эта задача заведомо нестационарная.

Тепловое сопротивление определяется, как разность температур в наиболее нагретой точке полупроводникового канала и на нижней плоскости подложки, отнесенной к мощности тепловыделения. Так как большое количество радиосистем работает с импульсными сигналами, то необходимо знать поведение полупроводников при нестационарном воздействии, то есть во время переходного процесса, поэтому экспериментальные измерения проводят как для непрерывных, так и для импульсных сигналов. Для определения теплового сопротивления бескорпусных полупроводниковых приборов, таких как транзистор или ММІС используются два подхода: экспериментальный на основе инфракрасной микроскопии [2] и расчетный, основанный на использовании тепловых симуляторов. Экспериментальные измерения транзисторов проводятся с помощью ИК микроскопа с достаточным увеличением и разрешающей способностью, при этом сам транзистор устанавливается на верхнюю плиту термостатированного столика. На практике используется огромное количество сочетаний скважности q_u и длительности импульса t_u , поэтому удобный подход состоит в нахождении итоговой зависимости импульсного теплового сопротивления от длительности t_u в логарифмическом масштабе для семейства кривых с различными значениями скважности q_u . Например, для GaN микросхемы на подложке SiC была рассчитана зависимость теплового переходного сопротивления, представленная на рисунке 1. Из этого рисунка следует, что при больших значениях t_u , переходное импульсное тепловое сопротивление R_{nep} асимптотически приближается к своему значению для непрерывного режима тепловыделения ($R_{np}=2,2$ К/Вт), то есть случая непрерывного СВЧ сигнала, а для коротких микросекундных импульсов тепловое сопротивление значительно меньше, чем измеренное в непрерывном режиме.

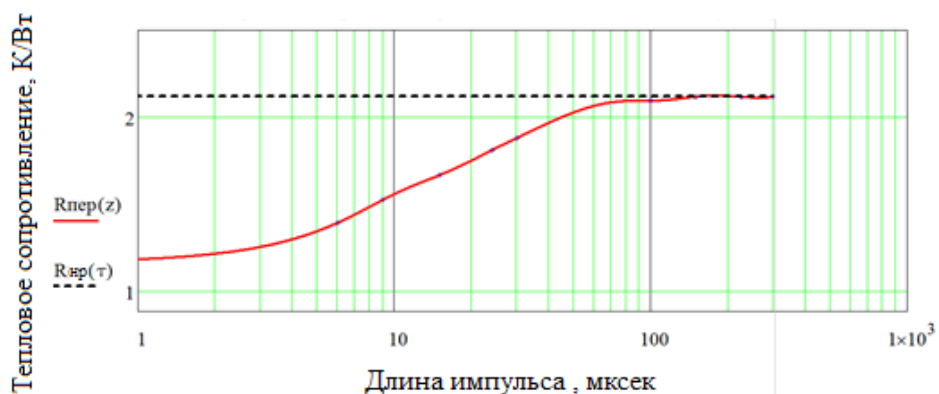


Рис.1 Тепловое переходное сопротивление GaN микросхемы на подложке SiC при различных длительностях импульса, скважность $q_u = 3$.

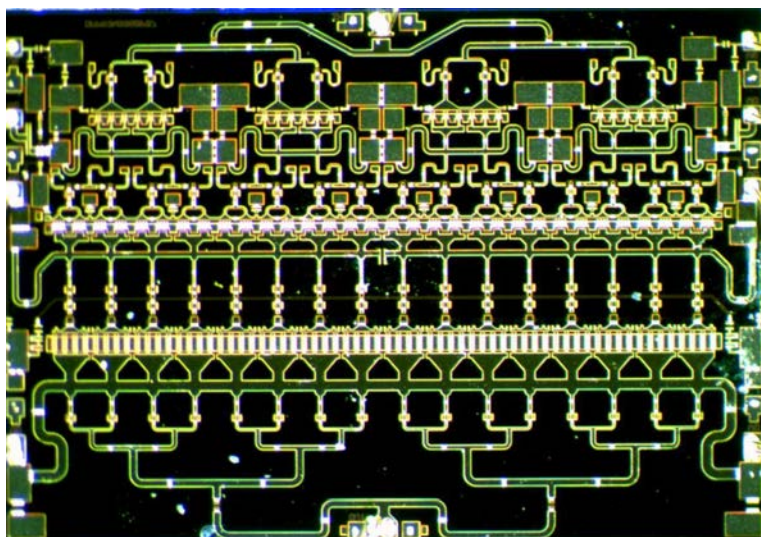


Рис.2 Фотография GaAs микросхемы миллиметрового диапазона с выходной мощностью 5 Вт.

Также расчетным путем решалась задача определения переходных тепловых сопротивлений для микросхемы миллиметрового диапазона, фото которой представлено на рисунке 2. Данная микросхема выполнена по арсенид-галлиевой технологии на подложке GaAs толщиной 50 микрон и имеет размер 4,3х3 мм. Результаты расчетов показаны на рисунке 3.

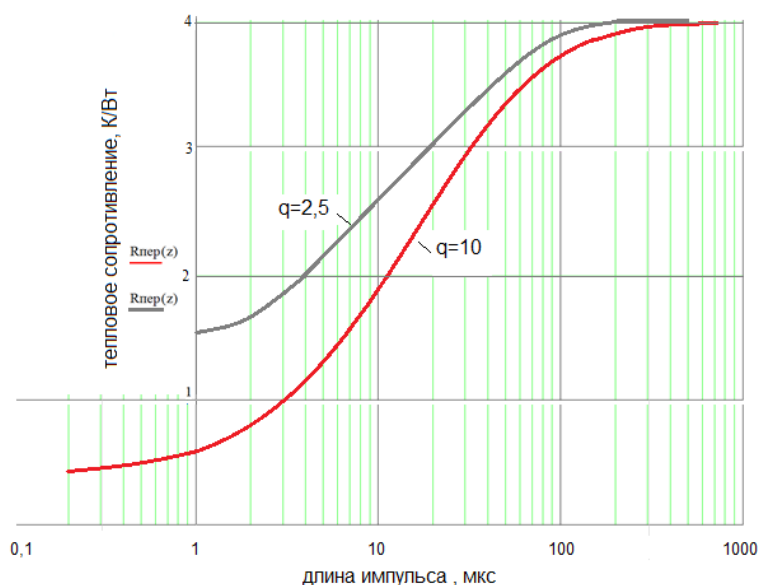


Рис.3 Тепловое переходное сопротивление GaAs микросхемы при различных длительностях импульса, скважность $q=2,5$ и $q=10$. Тепловое сопротивление стационарному нагреву равно 4 К/Вт.

Дополнение. Существует особый случай, который касается нагрева тонких пленок мощным источником СВЧ. Такая конструкция может встретиться, например, в мощных транзисторах или в высоковольтных сегнетоэлектрических управляемых устройствах – варикондах. В этом случае следует вспомнить, что исходный закон теплопроводности

Фурье (2) не учитывает скорости распространения тепла, то есть не применим для описания высокочастотных тепловых процессов. Полная форма закона Фурье с учетом времени тепловой релаксации τ_p выглядит следующим образом [3]:

$$\vec{q} + \tau_p \frac{\partial \vec{q}}{\partial t} = -\lambda \text{grad } T \quad (3)$$

Очевидно, что если τ_p стремиться к нулю, то уравнение (3) переходит в классическое уравнение Фурье (2). Для решения уравнения (3) принимается предположение, что скорость распространения тепловой волны равна скорости звука в рассматриваемом материале. Использование полной формы уравнения Фурье приводит к гиперболическому дифференциальному уравнению теплового поля [3]:

$$\Delta T - \frac{c_p}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} - \tau_p \frac{c_p}{\lambda} \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = -\frac{1}{\lambda} q(x, y, z) \quad (4)$$

Для рассмотренных в работе среднемощных GaAs и GaN микросхем результаты расчетов по уравнениям (1) и (4) совпали полностью, а графики рис.1 и рис.2 идентичны как без учета, так и с учетом скорости распространения тепла. Возможно, что соотношение (4) будет актуально для варикондов и более мощных транзисторов, например, 1 кВт и более [4].

Выводы. Выполненный в работе расчет позволил выявить наиболее напряженный импульсный режим нагрева микросхем GaAs и GaN при скважностях $q=2.5$ и $q=10$ при длительностях импульсов 0.3 мкс и 3 мкс в миллиметровом диапазоне волн.

Библиографический список

1. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М., Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах, «Энергия», Л.,1968,360с.
2. A. Prejs, S. Wood, R. Pengelly, W. Pribble. Thermal Analysis and its application to High Power GaN HEMT Amplifiers. IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), June 2009.
3. Солодов А.П. Электронный курс. Исследование одномерных нестационарных температурных полей. http://twi.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/HMT_E-Book/E-book/Foreword_HMT-E-book.pdf
4. J. Walker, G. Formicone, F. Boueri, B. Battaglia. 1kW GaN S Band Radar Transistor. IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, Tel Aviv, Israel, 21-23 October 2013.